

## A Study on the Reliability Evaluation for Incheon International Airport Distribution System

金龍河\* · 李 范\*\* · 崔祥圭\*\*\* · 鄭英植\* · 文廷虎<sup>§</sup>

(Yong-Ha Kim · Buhm Lee · Sang-Kyu Choi · Young-Sik Chung · Jeong-Ho Moon)

**Abstract** - This study is focused on the reliability evaluation for distribution system based on deterministic evaluation technique. Average failure rates, average outage time, and average annual outage time of electrical parts and load points are calculated through network reduction method and failure modes & effective analysis method. And reliability indices of distribution system are calculated. Finally, by employing analytic hierarchy process method, unique index which evaluates and improves the distribution system is calculated. As a result, finding weak points and expansion schedule of the system is possible. The usefulness of this method is verified by applying it to the Incheon International Airport.

**Key Words** : Reliability, Reliability Index, Analytic Hierarchy Process, Distribution, Incheon International Airport

### 1. 서 론

전력계통에 대한 신뢰도의 평가는 주로 전원계통에 대하여 이루어지고 있으며 복합계통이나 배전계통에 대한 연구는 이에 반하여 미미한 실정이다. 지금까지 개발된 신뢰도 평가는 크게 확률론적인 방법과 확정론적인 방법으로 대별되고 있으며, 이중 배전계통의 신뢰도 평가는 신뢰도 해석 기법상의 문제 등의 이유로 확정론적인 방법으로 Roy Billinton 등에 의해 방사상계통 및 병렬계통에 대한 신뢰도 및 신뢰도지수를 산정하는 방법에 대한 연구가 진행되어 왔다.[1][2] 이중 방사상으로만 구성된 계통은 일반화하여 신뢰도를 계산하는데 문제가 없으나, Loop나 병렬계통을 포함하는 계통에 대해서는 일반화하여 신뢰도를 계산하기는 힘들며, 따라서 개개의 계통에 맞추어 신뢰도를 효율적으로 계산할 수 있는 알고리즘이 개발·적용되어야 한다.

지금까지 인천국제공항과 같이 독립된 산업 시스템의 배전계통과 같은 설계된 계통의 신뢰도 평가는 주로 조류계산을 통하여 전압강하 및 선로용량의 한계성을 계산하고 이들에 문제가 발생하지 않는 경우 계통의 신뢰도가 우수한 것으로 막연히 평가하고 있는 실정이다.[3] 그러이러한 평가방법으로는 구체적으로 얼마만큼 신뢰도가 우수한 것인지 정량적으로 신뢰도를 평가 할 수 없으며, 또한 설비의 구성상태가 달라지면 얼마만큼 신뢰도에 영향을 미치는지를 알 수가 없다. 그러므로 객관적이고 정량적인 계통의 신뢰도를 표현할 수

있는 방법의 개발이 필수적인 작업이라 하겠다.

그러므로 본 연구에서는 이를 위한 기초적인 연구로서 확률론적인 적정성의 평가에 기반을 두고 산업시스템의 배전계통에 대하여 계통의 신뢰도를 다각적인 지수를 사용하여 정량적으로 평가할 수 있도록 하였으며 이들의 다양한 지수를 계층화 의사결정법[4]을 이용하여 의사결정자의 중요성 판단에 근거한 하나의 정량화된 신뢰도지수로서 종합할 수 있는 방법을 개발하였다. 즉, 설계된 계통에 대하여 신뢰도를 산정하고 또한 구성상태를 변경하였을 경우 계통의 신뢰도가 얼마만큼 달라지는지를 알 수 있는 정량적인 신뢰도지수 산정 기법을 개발하여 보다 객관적으로 시스템의 신뢰도를 평가할 수 있도록 하였다.

이를 통하여 각 설비부분에서의 신뢰도 평가를 통하여 시스템 전체의 신뢰성이 균일한 수준으로 설계되었는지를 평가할 수 있으며 이를 활용하여 시스템의 약점이나 보강계획등도 명료하게 판단할 수 있게 하였다.

제안한 방법을 대규모 부하이면서도 독립된 계통특성을 갖고 있는 인천국제공항의 배전계통[5]에 적용하여 본 연구의 유용성을 검증하였다.

### 2. 신뢰도의 산정

설비의 신뢰도를 표현하는 신뢰도만으로는 계통이 내포하고 있는 다양한 종류의 특성을 명확히 표현하기가 어렵기 때문에 이들을 이용하여 계통의 여러 가지 특성을 충분히 표현할 수 있는 적정한 신뢰도지수의 산정이 필요하며, 또한 이들 지수를 종합적으로 평가할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

#### 2.1 설비신뢰도의 표현

전기설비가 어느 정도나 고장이 발생할 개연성이 있는지에

\* 正 會 員 : 仁川大 電氣電子工學部 副教授, 工博

\*\* 正 會 員 : 麗水大 電氣 및 半導體工學科 助教授, 工博

\*\*\* 正 會 員 : 安養科學大學 電氣制御科 助教授, 工博

§ 正 會 員 : 新空港建設公團 電力處 電力施設 科長

接受日字 : 1998年 12月 11日

最終完了 : 1999年 5月 6日

대한 평가를 하기 위하여 1년동안 고장으로 운전을 할 수 없는 빈도가 얼마인지를 나타내는 고장률  $\lambda$  와 일단 고장이 발생하면 어느 정도나 고장이 지속되는지를 나타내는 고장지속시간  $r$  을 사용한다.

2.2 신뢰도의 계산[1]

2.2.1 직렬 및 병렬계통

대부분의 배전계통은 어떤 선로의 고장으로부터 다른 선로의 설비의 보호, 계획정비나 사고시 부하의 차단량의 최소화 등의 이유로 방사상으로 운전되고 있으며, 배전선로중 일부는 예비선로를 포함하는 2회선 이상이 병렬로 연결되어 있다. 이러한 경우 신뢰도는 표 1로 계산한다.

표 1 직렬 및 병렬계통의 신뢰도

Table 1 Reliability of serial and parallel system

	직렬계통의 신뢰도 식(1)	병렬계통의 신뢰도 식(2)
고 장 율	$\sum_i \lambda_i$	$\frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2}$ $\approx \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)$ 단, $\lambda_i r_i \ll 1$
고장 지속 시간	$\sum_i \lambda_i r_i / \sum_i \lambda_i$	$\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
년간고장지속시간	$\sum_i \lambda_i r_i$	$\lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2$

여기서  $\lambda_i$  : i 요소에 대한 고장률

$r_i$  : i 요소에 대한 고장지속시간

2.2.2 신뢰도의 계산법

배전계통은 다양한 종류의 전기설비가 직렬 및 병렬로 복잡하게 연결되어 있다. 따라서 계통축약 방법(Network Reduction Method)과 고장모드-효과분석법(Failure modes and Effects Analysis)등을 계통의 구성상태에 따라 복합적으로 사용한다.

(1) 계통축약법

계통 축약법은 직렬 및 병렬계산의 반복으로서 차례로 계통을 하나의 등가요소로서 축약시켜나가는 방법으로, 계통의 구성상태에 따라서 식(1) 및 식(2)를 이용하여 계속적으로 계통을 축약시켜 나가는 방법이다. 이 방법은 간략하게 계통의 신뢰도를 산정 하고자 하는 경우 많이 이용되고 있으나 계통의 구성이 단순하게 직렬 및 병렬만의 표현으로 불가능한 경우는 사용하기가 곤란하며 계통의 축약부분이 커질수록 실제적인 계통의 상태를 정확하게 반영할 수가 없는 단점도 있다.

(2) 고장모드-효과 분석법

고장모드-효과 분석법은 minimal cut set 이론에 근거하고 있다. 고장모드란 계통을 구성하고 있는 설비의 중복고장으로 인하여 수전점에 완전히 전력이 공급되지 못하는 경우를 의미한다. 이러한 경우는 병렬시스템에서 주로 발생하게 되며 2개의 설비가 병렬로 연결된 경우에는 식(2)로 각 고장모드에 대한 신뢰도를 계산한다.

이와같이 계산된 각 고장모드에 대한 신뢰도를 식(3)과 같은

직렬회로의 계산으로서 종합화하여 계통의 전체 신뢰도를 구한다.

$$\lambda_{total} = \sum_{pp} \lambda_{pp}$$

$$U_{total} = \sum_{pp} U_{pp} = \sum_{pp} \lambda_{pp} r_{pp} \tag{3}$$

$$r_{total} = \frac{\sum_{pp} U_{pp}}{\sum_{pp} \lambda_{pp}}$$

여기서  $\lambda_{pp}, r_{pp}$  : 전기를 공급할 수 없는 각 고장모드의 고장빈도 및 고장지속시간

2.3 배전계통의 각종 신뢰도 지수[2]

계통에는 다양한 크기의 부하가 연결되어 있기 때문에, 각각의 부하에 대한 신뢰도 이외에도 이들 부하에 대하여 복합적으로 신뢰도를 평가할 수 있는 지수를 계산할 필요가 있는데, 이러한 지수는 ① 계통의 성능을 평가하고, 취약지역을 보장하는데 사용될 수 있으며, ② 수용 가능한 신뢰도 평가의 기준을 설정하는데 사용될 수 있으며, ③ 실제의 계통운전을 수행하기 이전에 계통상황에 대한 예측을 수행 할 수 있다. 이들 지수는 표 2와 같이 수용가중심과 에너지중심의 지수로 나누어진다.

표 2 각종 신뢰도 지수

Table 2 Reliability indices

수 용 가 중 심 지 수				에너지중심 지수	
SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS	AENS
계통평균 고장빈도	계통평균 고장지속시간	수용가평균 고장지속시간	평균공급능력	에너지 불공급지수	평균에너지 불공급지수
$\frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i}$	$\frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i}$	$\frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i}$	$1 - \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \times T}$	$\sum L_i U_i$	$\frac{\sum L_i U_i}{\sum N_i}$

단,  $N_i$  : i 부하점에서의 수용가의 수

$L_i$  : i 부하점에 연결된 평균부하 [ KW ]

$T = 8760$  : 1년의 시간 수 (365(일) × 24(시간))

2.4 계층화의사결정법[4]

배전계통의 신뢰도의 평가는 다양한 특성을 가지고 있는 여러가지 신뢰도지수에 의하여 평가되며, 대개의 경우 어떤 평가는 단면적이 아닌 다면적으로 이루어져야 한다. 일반적으로 이를 위한 가장 간단한 방법으로는 평가기준의 상대적인 가중치로서 평가치의 합을 구하는 다음과 같은 가법모델이 널리 이용되고 있다.

$$\sum_i w_i v_i \tag{4}$$

단,  $w_i$  : i 평가기준의 가중치 ( $\sum_i w_i = 1$ )

$v_i$  : 대체안의 i 평가기준에 대한 평가치

그러나 이질적인 평가기준에 대하여 직접 가중치를 부여하거나 물리적인 척도를 갖지 않는 정성적인 평가기준에 대해 대체안의 가중치를 직접 부여하는 것은 실질적으로 무척 어려운 일이다. 그러므로 이러한 문제를 해결하고자 계층화 의사결정법(Analytic Hierarchy Process : AHP)법이 개발되어 널리 사용되고 있다. 계층화 의사결정법은 가중치를 주지 않고 평가기준의 일대일 비교를 통하여 어느 평가기준이 다른 평가기준에 비해 얼마만큼이나 중요한지를 결정함으로써 간접적으로 평가항목에 대한 가중치(weight)를 도출해내는 방법으로, 평가항목의 일대일 비교에서는 2가지 요소만을 비교하므로 다른 방법에 비해 그 비교가 현저하게 간단해 다른 방법에 비해 보다 현실적이고 그 적용이 용이하다는 장점이 있다.

이의 방법으로 우선 목적계층을 합리적으로 결정하고, 전체목적 상위계층으로 하여 보다 구체적인 항목을 하위계층으로 결정한 다음 각 목적계층에 대한 평가항목간의 일대일비교행렬(A = [a<sub>ij</sub>])을 구한다. 이때 일대일비교행렬의 갯수는 직접적인 상위계층의 평가항목의 수(n)만큼 얻어지며 이들 요소에는 식 (5)의 관계가 성립한다.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \text{단, } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

이와같이 각 목적계층에 대한 평가항목간의 일대일비교행렬이 구해지면

$$A\omega^{(new)} = \lambda\omega^{(old)} \quad (6)$$

의 최대고유치근 λ<sub>max</sub>에 응답하는 고유벡터 [ρ<sub>i</sub>]를 구하여 이를 ∑ρ<sub>i</sub>=1로 정규화하여 최종적인 가중치 벡터 [ω<sub>i</sub>]를 구한다. 이와같은 방법으로 각 계층에 대한 고유벡터 [ω<sub>i</sub>]가 구해지면 이들을 이용하여 각 계층간의 고유벡터를 다음으로 종합화한다. 여기서, w<sub>B\*,A@</sub>는 목적계층 A의 평가항목 @에 대한 목적계층 B의 평가항목\*의 가중치이다.

$$[w_{A1}, \dots, w_{An}] \begin{bmatrix} w_{B1,A1} & w_{B2,A1} & \dots & w_{Bn,A1} \\ w_{B1,A2} & w_{B2,A2} & \dots & w_{Bn,A2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{B1,An} & w_{B2,An} & \dots & w_{Bn,An} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3. 인천국제공항 배전계통의 신뢰도 평가

#### 3.1 배전계통 신뢰도의 산정

인천국제공항은 독립된 계통의 특성을 갖고 있을뿐만 아니라 설비의 종류 및 그 구성의 상태가 다양하며 전원을 공급하기 위한 방법이 설비의 중요성에 따라 각기 다른 방식으로 구성되어 있으므로 그 특성에 맞도록 계통의 부분 부분에 대하여 신뢰도의 평가를 달리 하여야 한다. 그러므로 본 장에서는 우선 계통의 구성상태를 다음과 같이 구간별로 구분하고 그 구간에 대한 계통구성의 특성을 신뢰도 측면에서 분석하였으며 이를 기반으로 하여 신뢰도산정의 방법을 도출하

록 하였다. 이때 각 상위 부분의 신뢰도 결과는 하위부분의 신뢰도 계산을 위한 입력으로 사용하였다. 또한 산정된 신뢰도를 이용하여 전술한 다양한 종류의 배전신뢰도지수를 산정하고 AHP를 이용하여 계산된 신뢰도지수를 정량화된 단일지수로서 종합화하였으며 이로서 각종 시스템의 특성을 분석하여 유용한 정보를 도출하였다.

그림 1은 인천국제공항 배전계통의 개략적인 구성도로, G1은 발전기로 부터 발전기모선까지의 설비를, T1~T5는 송전선로를, S1~S4는 모선을 나타내었다.

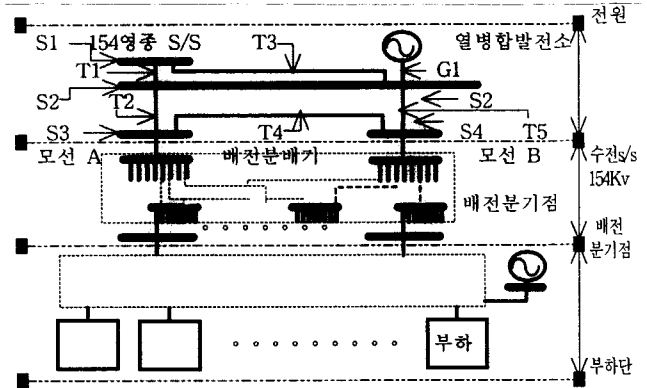


그림 1 인천국제공항 배전계통의 개략적인 구성도  
Fig. 1 Diagram of Incheon international airport distribution system

#### 3.1.1 신뢰도 산정

- (1) 전원 ~ 수전변전소 154Kv 모선구간  
우선 본 구간을 구성하고 있는 각 설비에 대한 신뢰도는 표 3으로 계산하였다.

표 3 각 설비의 신뢰도 산정  
Table 3 Reliability calculation of each equipment

설비	구 성 요 소	식
송전선로	단로기, 차단기, 단로기, 케이블헤드, 케이블, 케이블헤드, 단로기, 차단기, 단로기	(1)
발전기	(가스터어빈 발전기, 변압기, 차단기, 단로기), (가스터어빈 발전기, 변압기, 차단기, 단로기), (증기터어빈 발전기, 변압기, 차단기, 단로기)	(1)
모 선	154Kv측 모선은 이중모선을 사용하고 있으며 모선사이에 차단기가 연결되어있음	(2)

154Kv 모선은 다른 경로를 통해 전력을 공급받고 있으며, 모선사이에 선로를 확보하고 있어 계통을 축약하기 힘들며, 따라서 고장모드-효과분석법을 사용하여 신뢰도를 계산하였다. 표 4는 고장모드 해석을 위한 고장발생조합을 나타낸 것이다.

표 4 각 모선의 고장모드  
Table 4 Failure modes of each bus

대상 모선	고 장 발 생 조 합
모선 S2	{T1,T3,G1}
모선 A	{S2}, {S3}, {T2,T4}, {T2,T5}, {T2,S4}
모선 B	{S2}, {S4}, {T2,T5}, {T4,T5}, {T5,S3}

(2) 수전변전소 154Kv 모선 ~ 배전분기점 구간

이 구간에 대해서는 다음과 같은 3개의 구간으로 나누어 신뢰도를 산정하도록 하였다. ㉠ 구간은 154Kv 모선으로부터 22.9Kv 배전분배기 직전까지의 구간이며, ㉡ 구간은 22.9Kv 배전분배기의 구간이고, ㉢ 구간은 22.9Kv 배전분배기 이후부터 배전분기점까지의 구간을 나타내며 이들은 모두 방사상 계통으로 구성되어 있다. 표 5는 이의 계산 절차이다.

표 5 구간별 신뢰도 산정의 구성요소

Table 5 Components of section for reliability calculation

구 간	구 성 요 소	식
㉠구간	{단로기, 차단기, 케이블헤드, 케이블, 변압기, 케이블, 케이블헤드, 차단기, 단로기}	(1)
㉡구간	변압기로부터 전력공급 {22.9Kv모선,(단로기, 차단기), (단로기, 차단기), . . . , (단로기, 차단기)}	(1)
	다른분배기로부터 전력공급 {전력공급분배기, 단로기, 차단기, 단로기, 당해분배기}	
㉢구간	선로 {케이블헤드, 케이블, 케이블헤드, 차단기, 단로기}	(1)
	분기점 {22.9Kv모선,(단로기, 차단기), (단로기, 차단기), . . . , (단로기, 차단기)}	(1)

이 구간은 모두 방사상 계통으로 구성되어 있어, 계통축약법에 의해 신뢰도를 계산하였다.

(3) 부하단

인천국제공항은 다양한 부하를 갖고 있으며, 부하의 중요성에 따라 전력의 공급 방식이 다르게 구성되어 있다. 따라서 표 6과 같이 전력공급점의 개수에 따라 설비를 분류하고, 각각에 대하여 계통축약법 및 고장모드-효과분석법을 사용하여 신뢰도를 산정하도록 하였다. 한편, 배전계통의 각종 신뢰도 지수는 계통전체에 대하여 구해지게 된다. 그러나 계통의 성능을 평가하고, 취약지역을 보강하는 것을 목적으로 하는 경우에 있어서는, 계통을 구성하고 있는 부하의 특성을 고려하여 부하특성별로 신뢰도지수를 산정하고, 이를 부하의 중요성과 함께 비교·평가하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 표 6에서와 같은 방법으로서 부하를 분류하여 각 부하종류에 대한 각종 배전신뢰도를 산정하였다. 이 중 부하에 인접하여 설치되는 UPS는 UPS만의 신뢰도를 사용하여 계산하였다.

표 6 부하의 종류에 따른 전력공급 방식 및 계산절차

Table 6 Power supply method and calculation for each load group

부하집단	전 력 공 급 점			계 산 절 차	
	주전력 공급점	예비전력 공급점	비상 전 원	모선분리 위치	사 용 식
1	배전 분배기			주전력 공급점	(1)
2	배전 분배기	배전 분기점		열병합 발전소모선	(1)+(1) 2개의 축약 계통 (2)
3	배전 분배기	배전 분기점	발전기	열병합 발전소모선	(1)+(1) 2개의 축약 계통 (2) 비상전원 산입(2)
4	배전 분기점			예비전력 공급점	(1)
5	배전 분기점	배전 분기점		열병합 발전소모선	(1)+(1) 2개의 축약 계통 (2)
6	배전 분기점	배전 분기점	U.P.S.	열병합 발전소모선	(1)+(1) 2개의 축약 계통 (2) 무정전장치 산입 (2)

3.1.2 배전 신뢰도지수의 산정

본 연구에서는 3.1.1절에서 계산한 각 부하집단별 신뢰도를 사용하여 표 1의 배전계통에 대한 각종 신뢰도지수를 산정하도록 하였다. 그러나 계통의 성능을 평가하고, 취약지역을 보강하는 것을 목적으로 하는 경우에 있어서는 단순히 계통 전체에 대한 종합적인 신뢰도지수만을 산정하기는 어렵다. 따라서 부하의 중요성과 함께 비교·평가하여 취약지역 보강 등에 활용하기 위하여는 계통을 구성하고 있는 부하의 특성을 고려하여 부하집단별로 신뢰도지수를 산정하도록 하였다.

3.2 계층화 의사결정법에 의한 부하집단별 배전종합신뢰도의 중요도 산정

본 연구에서는 앞서 계산한 각 부하집단별로 계산된 다양한 특성을 가진 각종 배전신뢰도지수를 사용하여 계층화 의사결정법으로 부하집단별 배전종합신뢰도의 중요도를 단일화된 하나의 지수로서 정량화 할 수 있도록 하였다. 계층화 의사결정법을 이용하기 위해서는 우선 목적계층을 합리적으로 결정해야 하며 일반적으로 전체목적 상위계층으로 하여 보다 구체적인 항목을 하위계층으로 결정한다. 그러므로 본 연구에서는 하나의 정량화된 부하집단별 배전종합신뢰도의 중요도를 구하는데 전체목적은 신뢰도개선으로 하였으며, 목적계층A를 SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ENS, AENS로, 목적계층B는 각 부하집단으로 하였다.

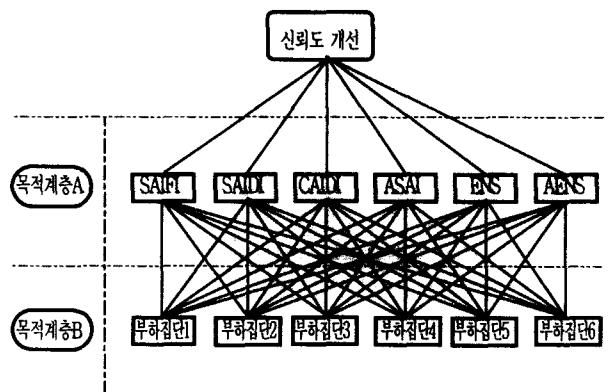


그림 2 본 연구에서의 계층화 의사결정법의 구조

Fig. 2 Structure of decision making

한편 일대일비교행렬을 구성하는데 있어서 우선 목적계층 1의 일대일비교행렬의 구성요소는 현재 전력회사에서 어떤 종류의 신뢰도지수를 가장 많이 사용하고 있는지를 조사하여 이를 기준으로 하여 일대일 비교를 하여 결정하도록 하였다.

한편, 목적계층 2의 일대일비교행렬의 구성요소는 부하집단별 신뢰도지수의 계산결과치를 사용하여 구성하도록 하였다. 즉, 우선 배전신뢰도지수의 특성을 파악하며 각 신뢰도지수의 관점에서 어느 부하집단이 중요한지를 해당되는 신뢰도지수의 계산 결과치를 표준화하여 일대일 비교를 통하여 상대적인 중요도를 결정하였다.

그림 3은 신뢰도 및 신뢰도지수 산정의 흐름도이다.

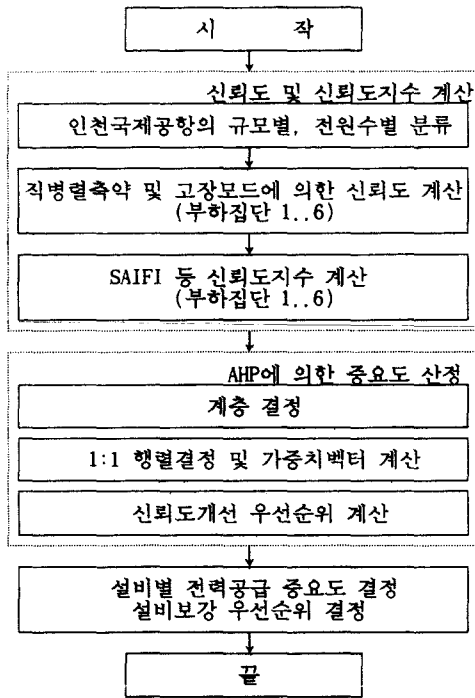


그림 3 신뢰도 및 신뢰도지수 산정의 흐름도  
Fig. 3 Flowchart of reliability assesment

4. 사례연구

4.1 인천국제공항의 배전계통 자료

(1) 고장빈도 및 고장지속시간

본 연구에서는 기존의 옥외설비를 기준으로 한 자료인 IEEE[6]에서 조사한 실적자료를 사용하여 신뢰도를 계산하였으며, 본 연구에서 사용된 각 기기별 고장빈도 및 고장지속시간의 자료는 표 7과 같다.

표 7 각 기기별 신뢰도 자료  
Table 7 Reliability data for each component

기	기	$\lambda_i$ (f/yr)	$r_i$ (h)
모	선	0.001129	261.0
차	단 기	0.0036	109.0
단	로 기	0.0061	1.6
발	전 기	0.1691	32.7
변	압기 (154/22.9)	0.0153	1178.5
케	이블 [ /Km (cc't)]	0.01109	16.0
케	이블헤드	0.000303	25.0

(2) 인천국제공항의 계통자료[5]

인천국제공항의 전원에서 배전분기점까지의 계통도는 다음 그림 4와 같으며, 각 설비의 특성은 실제계통자료를 사용하였다. 표 8 및 표 9는 참고로 본 연구에서 사용한 자료의 일부를 보인 것이다.

표 8 수전변전소 154Kv 모선 ~ 22.9Kv 배전분배기의 특성자료  
Table 8 Characteristics of substation 154Kv bus ~ 22.9Kv distributor

수전변전소모선	전력공급점	연결 변압기	배전분배기	피이더수
모선 A	A2 모선		A1	10
	A 모선	45/60 MVA	A2	10
	A 모선	45/60 MVA	A3	10
	A3 모선		A4	10
모선 B	B 모선	45/60 MVA	B1	12
	B 모선	45/60 MVA	B2	12
	B 모선	45/60 MVA	B3	12
	B3 모선		B4	12

표 9 부하의 특성자료(일부)

Table 9 Data of loads

부 하	배 전 점	길이 [Km]	P [KW]	부하 갯수
여객터미널 1지역 (#1, #2)	B2, B4	2.8	5084	459
	A2_동력	1.5		
	비상전원	1.5		
복합 교통센터지역 (#3, #4)	B2, B3	2.1	6130	813
	A2_동력	1.2		
	비상전원	1.2		
기내식 시설	A1	1.0	10000	128
	A3	1.0	6000	77
IBC 1	B4	2.1	1274	100
	A3_남측	2.1		
동력동 3	B4	1.1	14500	725

(3) 신뢰도지수의 일대일 비교행렬

우선 각 전력회사에서의 신뢰도지수의 사용빈도를 근거로 하여 계층1의 일대일 비교행렬을 구성한 결과가 표 10과 같으며 각 부하집단별로 산정된 신뢰도지수를 근거로 계층 2의 일대일 비교행렬을 구성한 결과중에서 계층 2의 SAIFI에 대한 일대일 비교행렬은 표 11과 같다.

표 10 계층 1의 일대일 비교행렬

Table 10 One to one matrix of first layer

	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS	AENS
SAIFI	1.0000	0.9090	1.3330	1.1500	1.8180	1.8180
SAIDI	1.1000	1.0000	1.1670	0.9570	2.0000	2.0000
CAIDI	0.7500	0.6820	1.0000	0.6520	1.3640	0.3640
ASAI	0.8700	1.0450	1.5330	1.0000	2.0910	2.0910
ENS	0.5500	0.5000	0.7330	0.4780	1.0000	1.0000
AENS	0.5500	0.5000	0.7330	0.4780	1.0000	1.0000

표 11 계층 2의 SAIFI에 대한 일대일 비교행렬

Table 11 One to one matrix of Second layer

	부하집단 1	부하집단 2	부하집단 3	부하집단 4	부하집단 5	부하집단 6
부하집단 1	1.0000	101.750	203.194	0.7710	65.7790	202.333
부하집단 2	0.0100	1.0000	1.9970	0.0080	0.6460	1.9890
부하집단 3	0.0050	0.5010	1.0000	0.0040	0.3240	0.9960
부하집단 4	1.2970	131.944	263.491	1.0000	85.2990	262.376
부하집단 5	0.0150	1.5470	3.0890	0.0120	1.0000	3.0760
부하집단 6	0.0050	0.5030	1.0040	0.0040	0.3250	1.0000

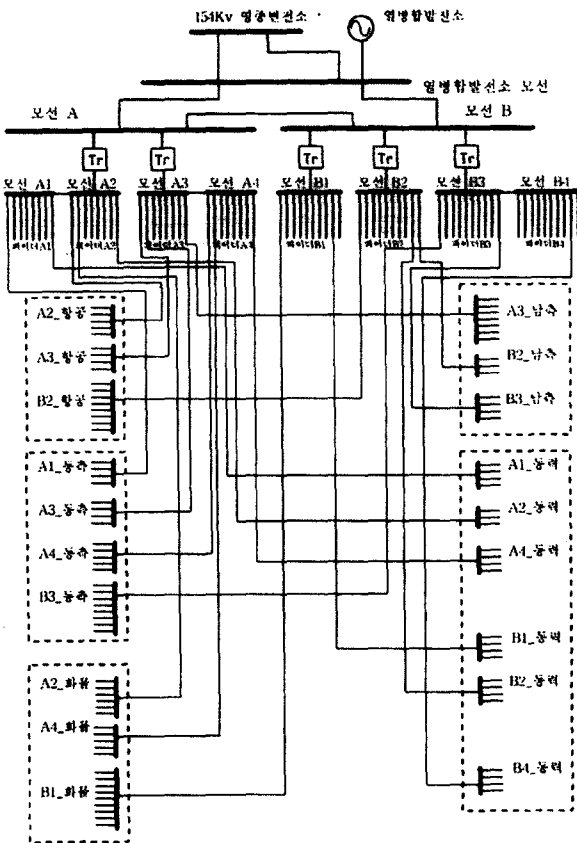


그림 4 인천국제공항의 계통도 (전원 ~ 배전분기점)  
Fig. 4 Diagram of Incheon international airport

4.2 신뢰도 평가결과

4.2.1 배전계통 신뢰도의 산정

인천국제공항의 신뢰도를 설비구간별로 고장빈도, 고장지속 시간을 계산하고, 최종적으로 부하집단에 대한 신뢰도를 계산하였다.

신뢰도산정 결과중 부하집단1, 부하집단2, 부하집단3의 신뢰도를 그림 5에, 부하집단4, 부하집단5, 부하집단6의 신뢰도를 그림 6에 나타내었다. 여기서 각 수치는 각 부하점에 있어서의  $\lambda$ ,  $r$ ,  $U$ 값을 의미한다.

그림 5 및 그림 6로부터 규모가 큰 부하인 부하집단 1,2,3은 주전력을 배전분배기(모선 A1~B4)로부터 공급받고 있으며, 규모가 작은 부하인 부하집단 4, 5, 6은 주전력을 배전분기점(A2\_항공~B4\_동력)으로부터 공급받고 있다. 또한 부하집단 1, 4는 주선로만을, 부하집단 2, 5는 주선로+예비선로를, 부하집단 3, 6은 주선로+예비선로+비상전원을 갖고 있다.

방사상계통인 부하집단1 및 부하집단4는 고장율이 크게 나타나는 반면, 주선로와 예비선로를 갖고 있는 부하집단2 및 부하집단5는 고장율이 크게 낮아지고 있어 예비선로의 확보시 신뢰도가 크게 향상하고 있음을 알 수 있다. 이중 부하집단 4의 동력동 B는 주선로와 예비선로 모두 154Kv 모선 A 측 전원을 사용하고 있어 부하집단 4 집단내의 다른 부하집단보다 고장율이 낮으나, 154Kv 모선 A 및 154Kv 모선 B로

부터 각각 전력을 공급받는 부하집단 5 또는 부하집단 6에 비해 상당히 고장율이 높아지고 있다. 또한 부하집단 3 및 부하집단 6은 주선로, 예비선로 이외에도 비상발전기 및 U.P.S. 등의 비상전원까지 확보하고 있어 더욱 고장율이 낮아지고 있음을 알 수 있다.

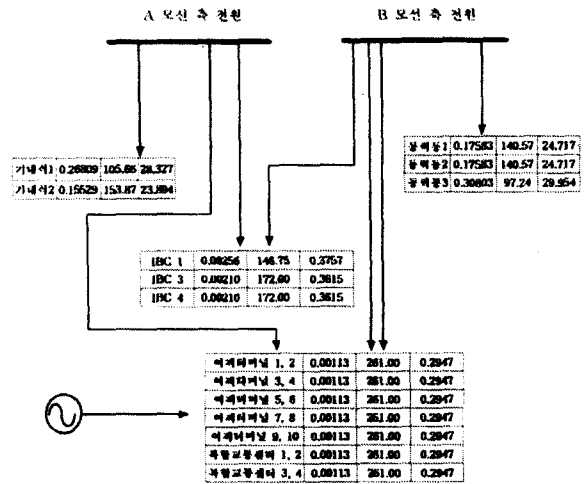


그림 5 부하집단1, 부하집단2, 부하집단3의 신뢰도  
Fig. 5 Reliability of load group 1, 2, 3

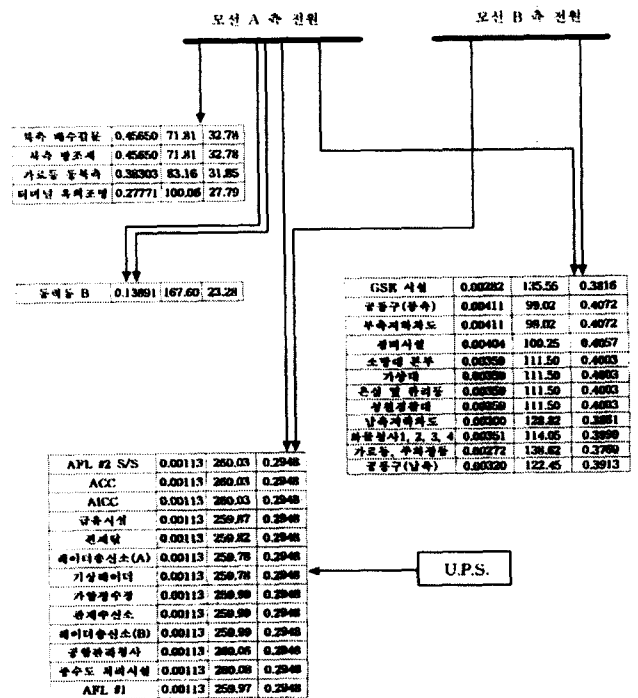


그림 6 부하집단4, 부하집단5, 부하집단6의 신뢰도  
Fig. 6 Reliability of load group 4, 5, 6

4.2.2 배전 신뢰도지수의 산정

그림 5 및 그림 6에서 산정된 신뢰도를 근거로 각종 신뢰도 지수를 산정한 결과를 표 12에 나타내었다.

표 12 배전신뢰도지수 산정결과

Table 12 Reliability indices

신뢰도 지수	수용가중심지수				에너지중심지수	
	SAIFI [횟수/수용가]	SAIDI [시간/수용가]	CAIDI [시간/수용가]	ASAI	ENS [MWh]	AENS [KWh/수용가]
부하집단 1	0.2294056	26.836026	116.98069	0.9969365	1380.0	697.0
부하집단 2	0.0022546	0.366246	162.44450	0.9999582	6.5	21.7
부하집단 3	0.0011290	0.294669	260.99976	0.9999664	11.1	2.9
부하집단 4	0.2974816	28.47109	95.70709	0.9967499	95.9	1917.2
부하집단 5	0.0034875	0.39721	113.89442	0.9999547	15.0	30.4
부하집단 6	0.0011338	0.29477	259.99289	0.9999664	7.0	21.1
계통전체 신뢰도	0.0682317	8.036877	117.78804	0.9990825	1515.5	217.2

우선 수용가중심지수를 살펴보면, SAIFI, SAIDI는 전력공급점이 1개인 경우보다 2개인 경우가, 2개인 경우보다 3개인 경우가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 전력공급점이 증가할 수록, 주전력공급점에 고장이 발생해도 예비전력공급점이나 비상전원으로부터 전력을 공급받을 수 있어 부하에 전력을 공급할 수 있는 능력이 증가하고 있기 때문이라 할 수 있다. 또한 소규모 부하보다는 대규모 부하의 신뢰도지수가 감소하고 있어 규모가 클 수록 신뢰도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 대규모 부하일 수록 22.9Kv 배전분배기에서 직접 전력을 공급하고, 일부선로는 주전력공급점~부하를 연결하는 선로가 2회선으로 구성되어 있는 등 신뢰도지하의 원인을 줄였기 때문이라 할 수 있다. 한편, CAIDI는 SAIFI, SAIDI와 반대로 전력공급점이 증가할 수록, 부하의 규모가 커질수록 증가하고 있음을 알 수 있다. 수용가당 고장지속시간이라 할 수 있는 SAIDI를 고장빈도로 나눈 값이라 할 수 있는 CAIDI는 일단 고장발생시에 얼마나 그 고장상태가 지속되는 가를 알고자 하는 것으로, 계통의 구조가 복잡할 수록, 부하의 규모가 커질 수록 고장지속시간이 길어짐을 알 수 있다. 즉, 전력공급점이 많고 규모가 큰 부하는 고장이 발생할 가능성이 매우 크게 감소하여 고장지속시간도 크게 감소하나, 일단 고장이 발생하면 고장이 지속되는 시간은 길어지게 된다. 또한 에너지중심지수로서 평균에너지 불공급지수인 AENS는 SAIFI, SAIDI와 마찬가지로 전력공급점이 증가할 수록, 부하의 규모가 커질 수록 감소하는 특성을 지니고 있음을 알 수 있다. 계통전체의 ENS는 각 부하군별 ENS를 합친 값과 같으며, ENS는 일반적으로 신뢰도가 증가함에 따라 감소하지만 부하의 크기가 클 수록 커지는 특성이 있다.

4.3 계층화의사결정법에 의한 배전종합신뢰도의 산정

표 12에서와 같이 각 부하집단별로 배전신뢰도를 산정하여 보면 각 부하집단에 대하여 신뢰도지수가 서로 다른 양상을 가지고 있으며 그 단위가 일정치 않아 어느 부하집단이 신뢰도의 측면에서 보강을 최우선적으로 요구하는지 또한 그 중요성이 다른 부하집단에 비하여 얼마나 되는지를 정량적으로 알 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 AHP를 이용하여 단일화, 정량화된 배전종합신뢰도를 산정하였다. 우선, 그림 2에서와 같이 계층의 수는 2개로 하였으며 계층1의 구성항목수는 6, 계층2의 구성항목수는 6개로 하였다. 또한, 계층1 및 계층2의 최대고유치 및 고유벡터 초기치는 모두 1로 하였다. 표

13 및 표 14는 각 계층의 구성항목에 대한 최대고유치근  $\lambda_{max}$ , 가중치벡터  $\omega_i$  및 수렴반복횟수를 보인 것이다.

표 13 계층1에 대한 최대고유치근 및 가중치벡터

Table 13 Maximum eigenvalue and weighting vector for first layer

상위 항목	반복 횟수	$\lambda_{max}$	$\omega_i$					
			SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS	AENS
전체 목적	5	5.853	0.2116	0.2144	0.1319	0.2210	0.1105	0.1105

표 14 계층2에 대한 최대고유치근 및 가중치벡터

Table 14 Maximum eigenvalue and weighting vector for second layer

상위 항목	반복 횟수	$\lambda_{max}$	$\omega_i$					
			부하집단 1	부하집단 2	부하집단 3	부하집단 4	부하집단 5	부하집단 6
SAIFI	5	6.0357	0.4288	0.0043	0.0021	0.5561	0.0065	0.0021
SAIDI	4	5.9985	0.4736	0.0065	0.0052	0.5025	0.0070	0.0052
CAIDI	4	5.9998	0.1158	0.1608	0.2584	0.0948	0.1127	0.2574
ASAI	3	6.0000	0.1663	0.1668	0.1668	0.1663	0.1668	0.1668
ENS	4	6.0086	0.9106	0.0043	0.0073	0.0632	0.0099	0.0046
AENS	5	6.0423	0.2591	0.0080	0.0011	0.7126	0.0113	0.0078

표 13과 표 14의 결과를 식(7)로 종합한 결과가 표 15와 같다.

표 15 신뢰도 개선의 우선순위

Table 15 Priority order for reliability improvement

	부하집단 1	부하집단 2	부하집단 3	부하집단 4	부하집단 5	부하집단 6
중요도	0.3736	0.0617	0.0735	0.3604	0.0570	0.0738
순위	①	⑤	④	②	⑥	③

신뢰도의 개선을 위한 중요도가 가장 낮은 소규모 2전원 부하집단을 기준으로 정규화시킨 각 부하집단의 신뢰도개선 측면에서의 중요도는 그림 7과 같다.

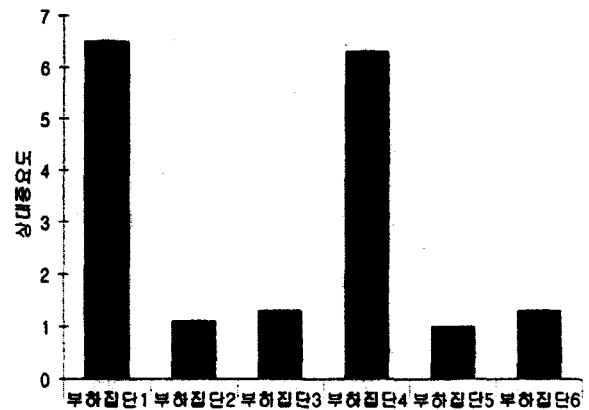


그림 7 정규화시킨 각 부하집단의 중요도(부하집단2를 기준)  
Fig. 7 Normalized importance for each load group

이로서 배전신뢰도의 종합적인 측면으로 본다면 계통신뢰도의 개선을 위하여서는 부하집단 1 및 부하집단 4를 보강하는 것이 보다 효과적이라 할 수 있으며, 이는 부하집단2, 부하집단3, 부하집단5, 부하집단6의 신뢰도를 보강하는 것에 비하여 약 5배 이상의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이와같은 결과로 미루어 본 인천국제공항의 신뢰도 개선을 위해서는 부하집단1과 부하집단4의 신뢰도를 개선하는 것이 효과가 있을 것으로 사료된다.

또한 부하집단 2, 3, 5, 6의 결과는, 표 12에서 부하집단 3, 6의 신뢰도가 부하집단 2, 5에 비해 SAIFI 등은 우수한 것으로 나타나는 반면 CAIDI 등은 반대로 나타나 어느 정도로 중요한지 알기 어려웠던 문제점을 종합화한 것이다. 이의 결과, 그림 7과 같이 부하집단 2, 5의 중요도는 부하집단 3, 6에 비해 미소하나마 낮게 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 인천국제공항에 대하여 신뢰도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인천국제공항의 배전계통에 대하여 각 설비의 특성에 적합한 방법으로 신뢰도를 계산한 결과, 모선 A1, A4, B4의 고장율은 A2, A3, B1, B2, B3의 고장율보다 나쁘게 나타나고 있으며, 직렬로 연결된 배전분기점의 고장율은 그림 5 및 그림 6과 같이 보다 나빠지고 있다. 이로써, 방사상계통으로 구성되어 있는 각 배전분배기 및 배전분기점의 고장율은 직렬구간을 많이 거칠수록 나빠지고 있으며, 각 부하의 고장율은 전력공급점이 증가할수록, 선로의 길이가 짧을수록, 전력공급과정 중간에 거치는 설비가 적을수록 고장율의 측면에서 개선되고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 계통전체에 대하여만 배전신뢰도지수를 산정하는 종래의 방법에서 진일보하여, 규모별, 전력공급방법별로 부하를 분류하고 각각의 부하종류에 대하여 각종 신뢰도지수를 산정하고 이를 종합적으로 분석한 결과, 표 12로부터 SAIFI 등과 같은 지수는 부하집단 3>2>1 및 부하집단 6>5>4의 순으로 신뢰도지수가 우수하게 나타나고 있는 반면, CAIDI 등의 지수는 반대로 나타나고 있음을 알 수 있어 각 지수의 특성에 따라 신뢰도가 상이함을 알 수 있었다.
- (3) 계층화의사결정법을 도입하여 부하종류별로 계산된 배전신뢰도를 신뢰도지수의 중요도를 감안한 단일화된 하나의 지수로 정량화 할 수 있도록 하여 배전계통신뢰도를 개선할 수 있는 효율적인 계통보강기준 등을 도출한 결과, 표 15 및 그림 7로 부터 전력공급점이 1개인 부하집단1과 부하집단4를 보강하였을 때 계통의 신뢰도개선이 효과적으로 나타나고 있어 취약설비의 보강이 계통전체의 신뢰도를 효과적으로 상승시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 추후, 배전계통에 조류계산 및 제한적인 전력공급에 대한 신뢰도인 Partial Loss Of Continuity (P.L.O.C.) 를 고려할 수 있는 방법을 개발하여 예비선로 및 비상전원에 대하여 보다 정확한 신뢰도를 산정할 수 있고, 보다 적절한 용량을 결정할 수 있는 기법의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Roy Billinton, Ronald N. Allen, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984.
- [2] Roy Billinton, Ronald N. Allen, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", Plenum Press, 1992.
- [3] LG산전 컨소시엄, "인천국제공항 수·변전시설사업 기술제안서", 1998
- [4] Marija D. Ilic, Shell Liu, "Hierarchical Power Systems Control - Its Value in a Changing Industry", Springer, 1996.
- [5] 신공항건설공단, "인천국제공항 수배전 기본설계 재정리 보고서", 1997.
- [6] IEEE, "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE, ANSI, 1991.
- [7] Charles R. Heising, "Examples of Reliability and Availability Analysis of Common Low-Voltage Industrial Power Distribution Systems", pp.90-104
- [8] Chanan Singh, Narayana Gubbala, Nagalakshmi Gubbala, "Reliability Analysis of Electric Supply Including Standby Generators and an Uninterruptible Power Supply System", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.30, No.5, pp.1298-1302, Sep./Oct. 1994.
- [9] George J. Potochney, Wayne L. Stebbins, "The Application of Statistical Reliability Data in the Selection of a Utility Power Supply Scheme for an Industrial Plant", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.IA-15, No.5, pp.554-559, Sep./Oct. 1979.
- [10] Don O. Koval, "Transmission Equipment Reliability Data from Canadian Electrical Association", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.32, No.6, pp.1431-1439, Nov./Dec. 1996.
- [11] Charles R. Heising, "Quantitative Relationship Between Scheduled Electrical Preventive Maintenance and Failure Rate of Electrical Equipment", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.IA-18, No.3, pp.268-272, May/June 1982.
- [12] Luke Yu, Roy T. Beck, "Reliability and Availability Studies For Industrial Power System Analysis"



저 자 소 개



**김 용 하 (金 龍 河)**

1959년 5월 16일생. 1982년 고려대 전기공학과 졸업. 1987년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 인천대학교 전기전자공학부 부교수.

Tel : (032) 770-8434

E-mail : yhkim@lion.inchon.ac.kr



**정 영 식 (鄭 英 植)**

1958년 2월 14일생. 1983년 인하대 전기공학과 졸업. 1985년 Univ. of Pittsburgh 대학원 졸업(석사). 1990년 동대학원 졸업(박사). 1991년~현재 인천대학교 전기전자공학부 부교수.

Tel : (032) 770-8433

E-mail : @lion.inchon.ac.kr



**이 범 (李 范)**

1959년 10월 28일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1989년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 여수대학교 전기 및 반도체공학과 조교수.

Tel : (0662) 659-3313

E-mail : buhmlee@yosu.yosu.ac.kr



**문 정 호 (文 廷 虎)**

1958년 1월 20일생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 인천대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984~1987년 LG전선 근무. 1987~1995년 한국전력공사 근무, 1995년~현재 인천국제공항공사 근무

Tel : (032) 890-5219



**최 상 규 (崔 祥 圭)**

1960년 12월 22일생. 1983년 충북대 전기공학과 졸업. 1986년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년~현재 안양과학대학 전기제어과 조교수.

Tel : (0343) 441-1326

E-mail : cskm@aytc.anyang-c.ac.kr